

투명 아크릴 기판에 실버그리드(Silver Grid)를 함몰시킨 유연 투명전극 제조

백승석 · 윤대건 · 황경석 · 장수희 · 진병두 · 황석호[†]

단국대학교 고분자공학과

(2016년 10월 26일 접수, 2016년 12월 27일 수정, 2016년 12월 30일 채택)

Preparation of Flexible and Transparent Electrode Embedded Silver Grid into Acrylic Polymer Substrate

Seung-Suk Baek, Dai Geon Yoon, Gyungseok Hwang, Su-Hee Jang, Byung-Doo Chin, and Seok-Ho Hwang[†]

Department of Polymer Science & Engineering, Dankook University, Yongin, Gyeonggi 16890, Korea.

(Received October 26, 2016; Revised December 27, 2016; Accepted December 30, 2016)

초록: 본 연구에서 광경화성 아크릴 단량체 조성물(methyl methacrylate, 2-hydroxyethyl acrylate, poly(ethylene glycol) diacrylate)을 이용한 고분자 기판 내부에 실버그리드(silver grid)를 잉크젯공정(ink-jet)과 전사공정(transfer process)으로 함몰시킨 유연 투명전극 기판을 제조하였다. 인터페로미터를 사용하여 광경화된 고분자 기판 내부에 실버그리드의 함몰된 형태 및 표면을 확인하였으며, 그것의 광학적 특성과 밴딩테스트 후 전기적 특성으로 제조된 유연 투명전극 기판의 물성을 고찰하였다. 유연 투명전극 기판으로서의 유용성을 확인하기 위해 poly(3-hexylthiophene):[6,6]-phenyl-C₆₁ butyric acid methyl ester(P3HT:PCBM)으로 유기 태양전지 소자를 제작하여 2.52%의 효율 특성을 얻었다.

Abstract: Using the UV-curable acrylate formulations consisting of methyl methacrylate, 2-hydroxyethyl acrylate and poly(ethylene glycol) diacrylate, flexible and transparent electrode embedded silver grid into the polymer substrate was fabricated through ink-jetting technique and transfer process. The profile morphologies and surface characteristics of silver grid in the polymer substrate were estimated by interferometer. Furthermore, the optical properties as well as electrical-resistance changes during bending test of the electrode were also measured. As one of utilitarian applications for the electrode, the optimized organic solar cell was constructed on the electrode by using poly(3-hexylthiophene):[6,6]-phenyl-C₆₁ butyric acid methyl ester (P3HT:PCBM) system and then power conversion efficiency of the device was 2.53%.

Keywords: flexible electrode, transparent, silver grid, ink-jet, acrylate, UV-curing.

서 론

투명전극은 유기 발광다이오드와 유기 태양전지 등과 같은 유기 광전소자에서 필수적으로 사용되고 있는 전자재료로서 대부분, 인듐 주석 산화물(indium tin oxide; ITO)이 사용되고 있다.¹ ITO는 높은 투과율과 전도성을 가지고 있어 현재 평면 유기광전소자에 적용함에 문제가 없었지만,² 결정성 구조를 가지고 있어 변형에 대한 신뢰성이 부족하여 유연성을 요구하는 차세대 투명전극으로 사용하기 어려움을 가지고 있고,³⁻⁵ 인듐의 한정된 매장량과 고온, 고압, 증착 공정 등의 높

은 제작비용의 단점을 가지고 있다.^{4,6}

ITO를 대체하는 투명전극용 소재로는 silver nanowire, metal grid, carbon nanotube, graphene, 전도성 고분자 등이 있지만, ITO와 투과도 및 전기적 특성 등을 비교하였을 때 문제점이 발생하여 이를 해결하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.⁷⁻¹³ 그 중 실버그리드(silver grid) 투명전극은 전도성이 우수한 silver를 기판 위에 grid 형태로 인쇄하는 방법으로 grid의 선폭과 간격 등을 조절하여 투명전극의 광학적 및 전기적 특성을 동시에 만족시킬 수 있다.¹⁴⁻¹⁶ 또한 유연기판으로 사용되는 소재로는 poly(ethylene terephthalate)(PET), poly(ethylene naphthalate)(PEN), polycarbonate(PC), polyimide(PI), poly(dimethylsiloxane)(PDMS) 등이 사용되고 있지만,^{5,8,17,18} 유기 광전소자의 고온공정에서 고분자의 변형, 고가의 소재, silver와의 접착력 문제 등의 문제가 있다.^{13,19}

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: bach@dankook.ac.kr

©2017 The Polymer Society of Korea. All rights reserved.

본 연구에서는 유기 태양전지 공정에서 요구하는 내열성, 실버그리드와 기판의 접착력, 유연기판으로서 요구되는 유연성 등을 만족시키기 위해 일관능기형 및 이관능기형 광경화성 단량체를 이용하여 유연기판 제조에 적용하였다. 유연 투명전극을 제조하기 위해 잉크젯 프린팅 공정으로 인쇄된 실버그리드를 광경화된 아크릴 기판으로 전사 및 삽입하였고, 용제를 사용하지 않는 광경화 공정을 이용하여 환경적 부담을 최소화하였다.²⁰⁻²² 제조한 유연 투명전극의 표면 구조, 광학적 및 전기적 특성을 확인하였고, 유기 태양전지 소자를 제작하여 효율특성을 확인하였으며, ITO를 대체하는 유연 투명전극으로서 가능성에 대해 고찰하였다.

실 험

시약 및 재료. Methyl methacrylate(MMA; Aldrich, USA), 2-hydroxyethyl methacrylate(2-HEMA; Aldrich, USA), poly(ethylene glycol) diacrylate(PEGDA $M_n=700$; Aldrich, USA), poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) (PEDOT: PSS; Clevious-P, Clevios™, Heraeus, Germany), poly(3-hexylthiophene) (P3HT; Nano-C), [6,6]-phenyl-C₆₁ butyric acid methyl ester(PCBM; Nano-C)는 정제과정 없이 그대로 사용하였다. 분자량 조절제(chain transfer agent)는 *n*-dodecyl mercaptan(Aldrich, USA)과 광개시제는 1-hydroxy-cyclohexyl phenyl ketone(Irgacure 184; Ciba specialty chemicals, Switzerland), 2,2-dimethoxy-2-phenylacetophenone (TCI, Japan)을 사용하였고, silver nano-particles ink는 DGP 40LT-15C (ANP, Korea)를 사용하였다.

광경화성 아크릴 시럽 합성. 2구 플라스크에 MMA(40 g), 2-HEMA(40 g), Irgacure 184(0.04 g), *n*-dodecyl mercaptan (0.04 g)을 투입한 후 상온에서 200 rpm의 일정한 속도로 교반하면서 고순도 N₂ 가스로 30분간 주입하였다. 주입이 완료된 후 고순도 N₂ 가스 기류하에서 혼합액을 교반하면서 플라스크 외부에 설치된 UV lamp(black light, 18W)를 조사시켜 공중합체를 중합하였으며, 적당한 점도의 혼합액이 형성될 때 반응을 종결시키기 위해 초고순도 air 기류 하에서 30분 동안 교반하여 라디칼반응을 종결하였다. 종결 후, 중합된 시럽(8 g), PEGDA(4 g), 2,2-dimethoxy-2-phenylacetophenone(0.02 g)을 혼합하여 광경화성 아크릴 시럽을 제조하였다.

실버그리드 프린팅. 실버그리드를 삽입 및 전사하기 위해 silver ink를 drop on demand 시스템의 잉크젯 프린팅 공정을 이용하여, 세척된 폴리이미드 필름(SK-Koron PI사)의 상부에 silver ink를 프린팅하였다. 폴리이미드 필름 위에 선형 패턴을 형성하기 위해 잉크젯 프린터(Omni-Jet 200; Unijet사)를 사용하였으며, 120 °C로 가열된 폴리이미드 필름 위에 2000 Hz(42 mm/sec)의 속도로 1200 dot per inch(DPI)의 해상도로 실버그리드를 프린팅하였다. 그 후, 120 °C로 가열된

hot plate에서 30분간 소결하였다. 실버그리드의 간격은 200 μ m, 선폭은 50 μ m, 높이는 400 nm, 전체의 크기는 2.54×2.54 cm²로 프린팅하였다.

실버그리드가 함몰된 유연 전극기판 제조. 실버그리드가 프린팅된 폴리이미드 필름 위에 광경화성 아크릴 시럽을 barcoater로 10.0 mm/sec의 일정한 속도로 코팅한 다음 이형 필름으로 산소를 차단하였다. 그 후, black light(30분)와 고압수는 램프(20분)를 조사하여 광경화 반응을 진행하였다. 광경화가 완료된 후, 폴리이미드 및 이형 필름을 제거하여 실버그리드가 함몰되어 있는 유연 투명전극 기판을 제조하였다.

유기 태양전지 소자 제작. 세척된 투명전극 위에 buffer layer로 isopropyl alcohol(IPA)과 1:1로 희석시킨 PEDOT:PSS를 도포한 후, 4000 rpm의 속도로 30초 동안 스핀코팅하였다. 그 뒤, 100 °C의 hot plate에서 30분 동안 건조하였다. PEDOT:PSS 위에 광활성화 층인 P3HT:PCBM을 도포한 후, 4000 rpm의 속도로 30초 동안 스핀코팅하였다. 그 뒤, 100 °C의 hot plate에서 30분 동안 건조하였다. 모든 건조는 N₂ 가스 분위기에서 진행하였다. 진공증착을 이용하여 LiF(0.01 nm/sec), Al(0.1 nm/sec)을 순서대로 P3HT:PCBM 위에 증착하였다. 제작한 유기 태양전지 소자구조는 PEDOT:PSS/P3HT:PCBM/LiF/Al의 구조이다.

광경화성 아크릴 시럽 분석. 합성된 아크릴 시럽의 분자량을 확인하기 위해 RI detector가 부착된 Agilent 1260 GPC system(agilent technologies)을 이용하여 분자량을 분석하였다. 사용한 컬럼은 PLgel 5 μ m MIXED-C(agilent technologies)를 25 °C에서 사용하였고, 전개용매는 HPLC용 THF(1 mL/min)를 사용하였다. 분자량 표준물질로 단일분자량의 폴리스티렌이 사용되었다. 시럽 내 고형분은 TGA Q50(TA instruments)을 이용하여 220 °C에서의 잔여중량을 측정하여 시럽 내 고형분의 중량으로 정의하였다.²³ 시료는 5-15 mg으로 승온 속도는 30 °C/min으로 30-600 °C까지 N₂ 가스 기류 하에서 측정하여 220 °C에서 중량을 백분율로 환산하여 시럽 내 고형분을 계산하였다. 시럽의 점도는 small sample adapter가 부착된 Brookfield 점도계(Model: DV2TLVTJ0)를 이용하여 상온에서 측정하였다.

실버그리드가 함몰된 유연 투명전극 기판 분석. 광학적 특성을 확인하기 위해 Lambda-350 UV/Vis spectrometer(Perkin-Elmer)를 이용하여 투과도를 측정하였고, gel content를 측정하기 위해 점착제를 속실텍 장치에서 acetone을 24시간 동안 환류시켜 미반응 물질을 녹여내었다. 그 후 남아있는 물질의 중량을 측정하여 초기 중량과 비교하여 gel content를 계산하였다. 밴딩 특성을 확인하기 위해 4 mm의 곡률 반경으로 1000 회 밴딩하여 실시간으로 전극기판의 저항값을 구하였다. 아크릴 기판 내 실버그리드가 삽입되어 있는 형태를 확인하기 위해 인터페로미터(NV-2400, NanoSystem Co. Ltd., Korea)로 측정하여 패턴의 함몰정도와 표면 상태를 확인하였다.

유기 태양전지 소자 분석. 제조한 유기 태양전지 소자의 효율을 IV measuring system(IVIUM Technology)으로 측정하였다. 측정시 사용된 광원은 SUN200 (ABET Technologies)을 이용하여 1 AM 1.5G Illumination(100 mW/cm^2)의 조건 하에서 측정되었다.

결과 및 토론

유기 태양전지, 유기 발광소자 등의 전자소자에서 전극으로 사용되는 ITO를 대체하기 위해 그래핀, metal nanowire, CNT, printed metal mesh 등이 사용되고 있으며, 본 연구에서는 잉크젯 프린팅 고정법과 광경화성 아크릴 시럽을 이용한 전사 및 함몰 메커니즘을 통해 유연 투명전극 기판을 제조하였다. 유기 태양전지에 적용 가능한 유연 투명전극 기판을 구현하기 위해 광경화성 아크릴 시럽을 중합하였다. 광중합을 통하여 분자량 60000 g/mol , 고형분 함량 13.46% 의 아크릴 시럽을 합성하였으며, 아크릴 기판 제조 공정을 위해 700 cPs 점도로 유지되도록 조절하였다(Table 1). 아크릴 시럽의 점도가 낮으면 충분한 두께의 기판을 얻기 힘든 반면에, 너무 높은 점도의 아크릴 시럽은 고른 코팅면을 유지하기 어렵기 때문에 적절한 점도는 $500\sim40000 \text{ cPs}$ 가 적절한 것으로 알려져 있다.²⁴ 아크릴 시럽을 구성하고 있는 단량체 중 MMA는 유기 태양전지 소자 제작과정 중 고온에서의 건조 공정에서 기판 변형을 방지하고자 기판의 내열성을 높이는 목적으로 사용되었으며, 2-HEMA는 단량체 내의 하이드록시기의 극성을 이용하여 폴리이미드에서 아크릴 기판으로 프린팅된 실버그리드의 전사력을 높이고자 사용되었다. 또한 PEGDA는 가교제 역할 및 아크릴 기판의 유연성을 높이고자

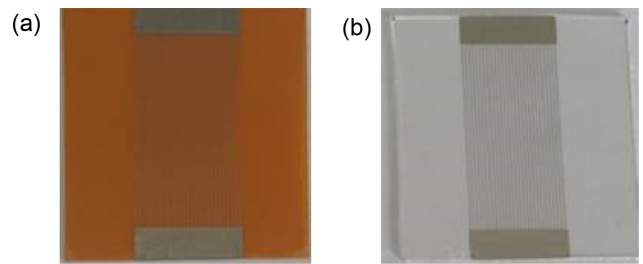


Figure 1. Camera images of (a) printed silver grid on polyimide film; (b) embedded silver grid into polymer substrate.

사용되었다.

폴리이미드 필름에 실버그리드 프린팅한 다음 아크릴 시럽을 도포하고 광경화 반응을 진행하였다. 광경화 후 폴리이미드 필름을 제거하였을 때, 프린팅된 실버그리드가 폴리이미드 필름 위에 남아있지 않아 광경화된 아크릴 기판으로 전사가 성공적으로 진행되었음을 확인하였다. 또한 광경화반응의 정도를 확인하기 위해 속싯 장치로 실버그리드가 전사된 아크릴 기판에 대한 gel content를 측정하였으며, 24시간 동안 아세톤으로 환류시킨 결과, 약 92% 의 값을 얻어 충분히 경화되었음을 확인하였다.

Figure 1은 실버그리드를 폴리이미드 필름 위에 프린팅한 Figure 1(a)와 실버그리드가 함몰된 아크릴 기판의 Figure 1(b)이다. 육안으로 실버그리드가 함몰된 아크릴 기판을 확인하였을 때, 폴리이미드 필름 위에 프린팅하였던 실버그리드의 형태를 그대로 유지하는 것은 광경화된 아크릴 기판으로 실버그리드가 성공적으로 전사 및 함몰된 것을 의미한다.

실버그리드가 필름 내 함몰된 상태를 확인하기 위해 인터

Table 1. Characteristics of the UV-curable Acrylic Syrup

	M_n (g/mol)	M_w (g/mol)	PDI	Solid content (wt%)	Viscosity (cPs)
Syrup	60000	150000	2.50	13.46	700

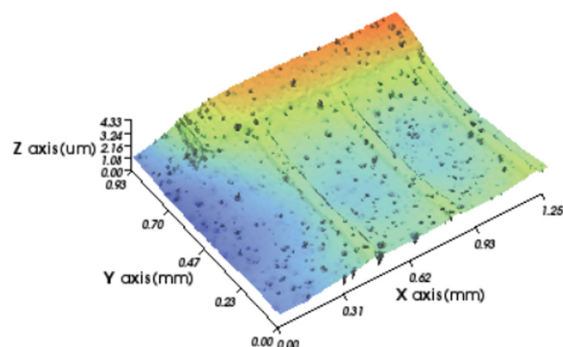
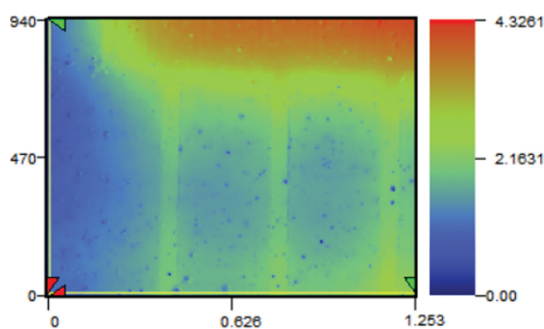


Figure 2. Interferometer images of embedded silver grid into polymer substrate.

페로미터를 이용하여 그 형태를 확인하였다. Figure 2에서 보는 바와 같이 silver line은 대부분 아크릴 기판 내로 함몰되어있지만, silver face는 돌출되어 있는 형태를 보여주고 있다. 이런 결과는 구조적으로 line보다는 face를 아크릴 기판으로 전사하기 어려운 것으로 판단된다. 그러나 line 부분에서 유기 태양전지가 가동되기 때문에 실버그리드가 함몰된 아크릴 기판을 전극으로 사용하기에 충분할 것으로 판단된다. 또한 일반적으로 잉크를 프린팅하였을 때 coffee-ring effect 때문에 edge 부분이 두껍게 혹은 날카롭게 된다.^{16,25} 그 상태로 전극으로 사용하였을 때, edge 부분에서 불량률 유발하기도 한다. 그러나 실버그리드가 함몰된 아크릴 기판은 폴리이미드 필름 위에 프린팅한 실버그리드를 광경화된 아크릴 기판으로 전사되어 날카로운 edge가 아크릴 기판 안으로 들어간 형태이므로 전극기판으로 사용시, 불량률 줄일 수 있는 요인으로 작용될 수 있다고 판단된다. 또한 3M사의 scotch magic tape 810D를 이용하여 실버그리드와 아크릴 기판과 부착성을 5회 테스트한 결과, 실버그리드와 아크릴 기판 사이에 떨어짐이 전혀 발생하지 않아 전극기판으로 적용이 가능할 것으로 판단된다.

유기 태양전지는 빛을 소자 내부의 광활성층이 흡수함에 따라 구동되기 때문에, 사용되는 두 전극 중 하나는 반드시 투명성을 확보해야 한다. 따라서 전기적 및 광학적 특성을 만족하는 ITO가 일반적으로 유기태양전지의 투명전극으로 사용되고 있다. 실버그리드가 함몰된 아크릴 기판은 50 μm 의 선을 반복적으로 배열하여 전기적 특성을 만족하는 동시에 선 사이로 빛을 투과시킬 수 있어 개구율을 높일 수 있으므로 투명성도 확보할 수 있다. 아크릴 기판의 광학적 특성을 확인하기 위해 UV-vis spectrometer를 이용하여 가시광선 영역의 투과도를 측정하였으며, Figure 3에 결과를 나타내었다. 실버그리드가 함몰되어 있지 않은 동일한 아크릴 기판의 광

투과도는 약 92%로 높은 투과율을 보여주었지만, 실버그리드가 함몰된 아크릴 기판의 광투과도는 약 78%로 실버그리드의 영향을 받아 투과도가 감소하였다. 그러나 기존의 ITO 기판과 비교하였을 때, 550~650 nm의 파장에서는 비슷한 투과도를 보여주었고, 그 외 다른 파장에서는 더 우수한 투명성을 보여주었다. 실버그리드가 함몰된 아크릴 기판이 유기 태양전지 소자의 전극 기판으로 사용됨에 있어 충분한 투과도를 확보했음을 확인하였다.

제조한 실버그리드가 함몰된 아크릴 기판의 밴딩조건에 대한 신뢰성을 확인하기 위해 밴딩 테스트를 실시하였다. 0.5 cycle/sec의 속도로 1000회 실시하였으며, 실시간으로 전극의 저항값을 측정하여 저항값의 변화를 확인하여 Figure 4에 나타내었다. 현재 상용화되고 있는 ITO 투명전극의 저항은 20~50 ohm/cm로, 제조한 전극의 초기 저항값은 약 30 ohm/cm로 ITO 투명전극과 비교하였을 때, 유기 태양전지의 전극으로 사용되기 충분한 전기적 특성을 보여주었다.²⁶ 또한 밴딩 실험을 1000회 실시한 후에도 약 60 ohm/cm의 값을 보여주어 전극에 변형을 주어도 유기 태양전지 소자의 전극으로 사용될 수 있음을 확인하였다. 실버그리드를 아크릴 기판 내 함몰시키지 않고, 아크릴 기판 위에 바로 인쇄하였을 경우는 초기 저항값은 삽입된 아크릴 기판과 비슷하였지만, 밴딩 후 급격하게 저항이 증가하는 것을 확인하여 투명전극 기판으로 사용될 시에는 아크릴 기판 내 실버그리드를 함몰시킨 유연전극 기판이 더욱 적합한 특성을 보여주었다.

실버그리드가 함몰된 아크릴 기판을 이용하여 유기 태양전지 소자를 제작하였으며, PET 기반의 ITO 기판으로 제작한 유기 태양전지 소자와 I-V 특성 및 효율 특성을 비교하여 Figure 5에 나타내었다. 실버그리드가 함몰된 아크릴 기판을 사용한 유기 태양전지 소자는 9.93 mA/cm²의 단락전류(short-circuit current, J_{sc}), 42%의 fill factor(FF), 0.61 V의 개방회로

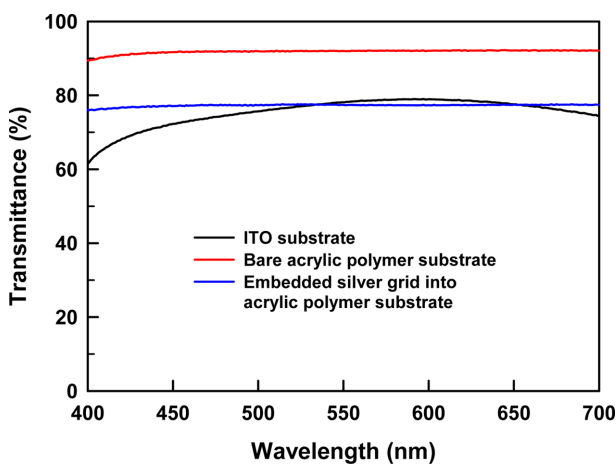


Figure 3. Transmittance of ITO substrate, bare acrylic polymer substrate and embedded silver grid into acrylic polymer substrate.

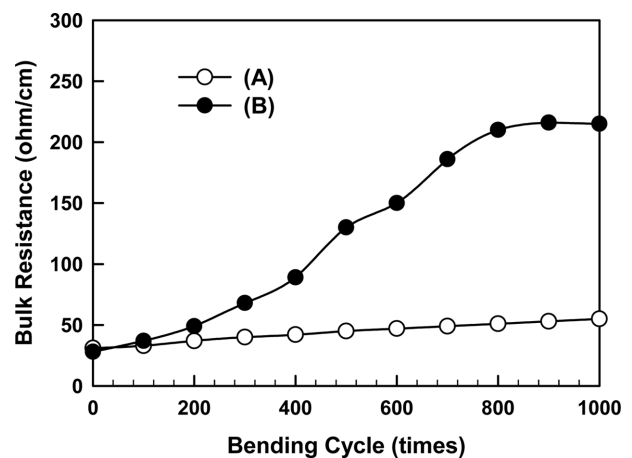


Figure 4. Bulk resistance of (A) embedded silver grid into polymer substrate; (B) printed silver grid on acrylic polymer substrate under bending test.

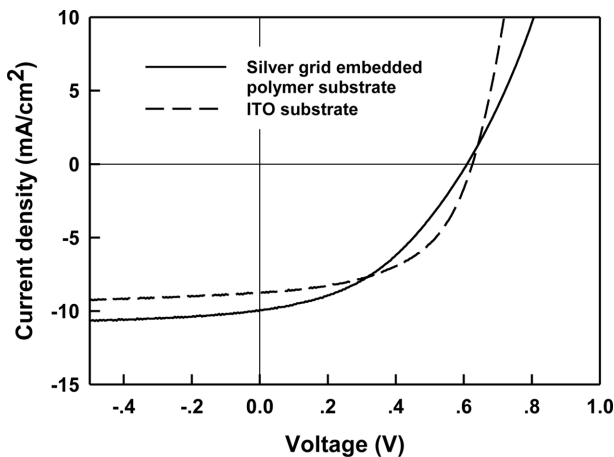


Figure 5. I-V characteristics of the organic solar cell based on different transparent electrodes.

전압(open-circuit voltage, V_{oc}) 값을 보여주었으며, 효율은 2.52%로 측정되었다. ITO 기판을 사용한 유기 태양전지 소자는 8.75 mA/cm^2 의 J_{sc} , 52%의 FF , 0.63 V의 V_{oc} 값을 보여주었으며, 효율은 2.85%로 측정되었다. 이러한 효율은 이전에 발표된 PET 기판의 ITO 기판을 사용한 소자의 효율과 유사한 결과이다.²⁷ 실버그리드가 함몰된 아크릴 기판을 사용한 유기 태양전지 소자는 J_{sc} 와 V_{oc} 값에서 ITO 기판으로 제작한 유기 태양전지 소자와 동등 혹은 향상된 값을 보여주고 있으며 기존의 유사한 구조의 전극 하에서 제작한 유기 태양전지 소자 효율값(1.4-2.5%)과^{28,29} 유사하였지만, FF 가 낮아 전체적인 효율이 다소 감소한 값을 보여주었다. 이는 유기 태양전지 소자 제조 공정을 보완하고 전극과 그 위에 쌓는 층들의 표면을 제어하여 FF 를 개선한다면, ITO 기판을 사용한 유기 태양전지 소자와 비슷하거나 향상된 효율을 보여줄 것이라고 판단된다.

결 론

본 연구에서는 실버그리드가 함몰된 아크릴계 유연 투명전극 기판을 제조하기 위해 MMA, 2-HEMA, PEGDA 등으로 광경화성 필름 시럽을 합성하였고, 잉크젯 프린팅 및 광경화 공정을 이용하여 실버그리드가 함몰된 아크릴 전극 기판을 제조하였다. 인터페로미터로 프린팅된 실버그리드가 함몰된 아크릴 기판으로 전사되었음을 확인하였고, 그 전극 기판의 투과도 및 밴딩조건에 따른 전극의 저항변화를 측정하여 유기 태양전지 소자에 적용할 수 있는 유연 투명전극 기판으로 충분한 특성임을 확인하였다. 또한 실버그리드가 함몰된 아크릴 기판으로 실제 유기 태양전지 소자를 제작한 결과, 정상적으로 유기 태양전지 소자가 구동됨을 확인하였다. 이러한 결과는 실버그리드가 함몰된 아크릴계 유연 투명전극 기

판은 유기 태양전지 등의 다양한 전자재료 분야에서 적용될 수 있을 것으로 기대한다.

감사의 글: 본 연구는 BK21 플러스 사업(단국대학교, 유기 광전자 기능소재 인력양성팀)과 경기도 지역협력 연구사업(GRRC 단국 2014-B01)에 의하여 지원되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. R. B. H. Tahir, T. Ban, Y. Ohya, and Y. Takahashi, *J. Appl. Phys.*, **83**, 2631 (1998).
2. H. Ohta, M. Orita, M. Hirano, H. Tanji, H. Kawazoe, and H. Hosono, *Appl. Phys. Lett.*, **76**, 2740 (2000).
3. J. K. Wassei and R. B. Kaner, *Mater. Today*, **13**, 52 (2010).
4. J. Liu, D. Wu and S. Zeng, *J. Mater. Process. Technol.*, **209**, 3943 (2009).
5. Y. Galagan, J. E. J. Rubingh, R. Andriessen, C. C. Fan, P. W. Blom, S. C. Veenstra, and J. M. Kroon, *Sol. Energ. Mat. Sol. C*, **95**, 1339 (2011).
6. M. Y. Lee, J. S. Kim, and J. H. Seo, *Thin Solid Films*, **521**, 60 (2012).
7. Y. H. Kim, C. Sachse, M. L. Machala, L. Müller-Meskamp, and K. Leo, *Adv. Funct. Mater.*, **21**, 1076 (2011).
8. K. Tvingstedt and O. Inganäs, *Adv. Mater.*, **19**, 2893 (2007).
9. C. J. Emmott A. Urbina, and J. Nelson, *Sol. Energ. Mat. Sol. C*, **97**, 14 (2012).
10. J. Wu, H. A. Becerril, Z. Bao, Z. Liu, Y. Chen, and P. Peumans, *Appl. Phys. Lett.*, **92**, 263302 (2008).
11. R. V. Salvatierra, C. E. Cava, L. S. Roman, and A. J. Zarbin, *Adv. Funct. Mater.*, **23**, 1490 (2013).
12. D. S. Leem, A. Edwards, M. Faist, J. Nelson, D. D. Bradley, and J. C. de Mello, *Adv. Mater.*, **23**, 4371 (2011).
13. D. Angmo and F. C. Krebs, *J. Appl. Polym. Sci.*, **129**, 1 (2013).
14. J. S. Yu, G. H. Jung, J. Jo, J. S. Kim, J. W. Kim, S. W. Kwak, J. L. Lee, I. Y. Kim, and D. J. Kim, *Sol. Energ. Mat. Sol. C*, **109**, 142 (2013).
15. I. Burgués-Ceballos, N. Kehagias, C. M. Sotomayor-Torres, M. Campoy-Quiles, and P. D. Lacharmoise, *Sol. Energ. Mat. Sol. C*, **127**, 50 (2014).
16. M. Layani, A. Kamyshny, and S. Magdassi, *Nanoscale*, **6**, 5581 (2014).
17. B. C. Kim, H. T. Jeong, C. J. Raj, Y. R. Kim, B. B. Cho, and K. H. Yu, *Synth. Met.*, **207**, 116 (2015).
18. K. Nakatani, K. Suzuki, and H. Okaniwa, *Sol. Energ. Mater.*, **17**, 265 (1988).
19. S. De, T. M. Higgins, P. E. Lyons, E. M. Doherty, P. N. Nirmalraj, W. J. Blau, J. J. Boland, and J. N. Coleman, *ACS Nano*, **3**, 1767 (2009).
20. R. Mehnert, A. Pincus, I. Janorsky, R. Stowe, and A. Berejka, *UV & EB Curing Technology & Equipment*, John Wiley & Sons, NY, p 1 (1998).

21. S.-S. Baek, S.-J. Jang, J.-H. Lee, D.-H. Kho, S.-H. Lee, and S.-H. Hwang, *Polym. Korea*, **38**, 199 (2014).
22. M. Nakazawa, *J. Adhes. Soc. Jpn.*, **36**, 28 (2000).
23. S.-S. Baek, S. W. Lee, and S.-H. Hwang, *Polym. Korea*, **37**, 121 (2013).
24. J. Piglowski and M. Kozlowski, *Rheol. Acta*, **24**, 519 (1985).
25. M. Neophytou, F. Hermerschmidt, A. Savva, E. Georgiou, and S. A. Choulis, *Appl. Phys. Lett.*, **101**, 193302 (2012).
26. S. K. Bae, S. J. Kim, D. Shin, J. -H. Ahn, and B. H. Hong, *Phys. Scr.*, **2012**, 014024 (2012).
27. K.-H. Choi, J. H. Kim, Y.-J. Noh, S.-I. Na, and H.-K. Kim, *Sol. Energ. Mat. Sol. Cells*, **110**, 147 (2013).
28. J.-S. Yua, G. H. Jung, J. D. Joa, J. S. Kim, J. W. Kim, S.-W. Kwak, J.-L. Lee, I. Y. Kim, and D. J. Kim, *Sol. Energ. Mat. Sol. Cells*, **109**, 142 (2013).
29. D. Kaduwal, B. Zimmermann, and U. Würfel, *Sol. Energ. Mat. Sol. Cells*, **120**, 449 (2014).